

## 确定避碰时机的模型

赵劲松 王逢辰

(航海系操纵与避碰教研室)

〔摘要〕 分析了各有关因素对避碰时机的影响,提出了船舶领域模糊边界和最危险时刻两个新概念,运用可拓集合论建立了确定避让行动开始时机的模型,从而为研制船舶自动避碰系统奠定了基础。

关键词:避碰时机;船舶领域;模糊边界;最危险时刻;自动避碰系统

船舶避碰辅助设备的发展过程经历了以信息收集为主的望远镜、雷达阶段,和以信息处理为主的 ARPA 阶段,下一步的发展方向是以进行避碰决策为主的自动避碰系统(*automatic collision avoidance system*, ACAS)阶段。要建立自动避碰系统,首先就要解决如何确定避让行动开始时机的问题。在这方面,日本和西欧的许多学者多年来进行了大量研究,取得了很大成绩,但在所考虑的影响因素、模型的理论根据和数学工具方面,还有不足之处。本模型正是针对这些问题,选用新的方法建立的,在现有的条件下力争使所存在的问题更少。

### 1 影响因素

我们的目的是要找出影响避让行动时机(*action time*, AT)的因素,然后分析它们对 AT 的影响,为建立模型打下基础。

根据对避碰过程所做的分析,我们归纳出如下的影响因素:DCPA<sub>0</sub>, TCPA, DCPA<sub>s</sub>, TCPA<sub>s</sub>, 航行水域、海况、气象条件(包括能见度)、交通密度、船舶尺度、航速、操纵性能、驾驶员的经验和水平、相对速度、相对方位、船速比以及让路义务等等。

为了就这些因素对 AT 的影响进行研究,我们对 50 位船长、驾驶员及专家学者进行了调查,得出了一些初步结果,现简述如下。

#### 1.1 DCPA<sub>s</sub> 方位对 DCPA<sub>s</sub> 值的影响

调查结果表明,DCPA<sub>s</sub> 方位对 DCPA<sub>s</sub> 值的影响同文献[1~3]的结论基本相同:DCPA<sub>s</sub> 在左舷时约为 1.3n mile,在右舷时约为 1.4n mile,在船首时约为 1.5n mile,在船尾时约

本文于 1988 年 12 月 11 日收到。

为 0.8n mile. 产生这种差异的主要原因在于驾驶员的心理因素和避碰规则的规定。

### 1.2 视距对 AT 的影响

视距对 DCPA<sub>s</sub> 和 TCPA<sub>s</sub> 都有影响,但互见中白天和夜间几乎没有什么差别。白天的 DCPA<sub>s</sub> 约为 1.2n mile,夜间的 DCPA<sub>s</sub> 约为 1.3n mile,能见度不良时 DCPA<sub>s</sub> 约为 1.6n mile,白天和夜间的 TCPA<sub>s</sub> 均约为 14min,能见度不良时约为 19min。

### 1.3 DCPA 改变量对 AT 的影响

在确定 TCPA<sub>s</sub> 和转向幅度  $\Delta C$  时不仅要考虑到 DCPA<sub>s</sub>,还要考虑 DCPA 改变量。为方便起见,我们用  $|DCPA_s - DCPA_0|$  来度量。最后用系数  $c$  来表示 DCPA<sub>s</sub> 改变量对 TCPA 的影响:

$$c = \left| \frac{DCPA_s - DCPA_0}{DCPA_s} \right|^{\lambda_1}$$

由调查结果得  $\lambda_1$  约为 0.5。

### 1.4 来船方位对 AT 的影响

来船方位对 AT 的影响主要表现为在交叉会遇中,随着来船方位的增加,本船向右转向避让时,避让效果越来越差。当来船舷角  $q$  小于  $65^\circ$  时,要达到同样的 DCPA<sub>s</sub>,  $\Delta C$  变化不大,当  $q$  大于  $65^\circ$  时,  $\Delta C$  几乎成线性增加。因此,为使  $\Delta C$  值不至于太大,当  $q$  大于  $65^\circ$  时应提前采取行动。用系数  $b$  来表示  $q$  对 TCPA<sub>s</sub> 的影响:

$$b = 1 + \left( \frac{q - 65^\circ}{q} \right)^{\lambda_2} \quad (65^\circ \leq q \leq 112.5^\circ)$$

由调查结果得  $\lambda_2$  约为 1。

### 1.5 相对速度和船速比对 AT 的影响

有些学者在研究中将两船船速作为影响因素,这是不确切的。从心理学上讲,接近速度越大,人们所感觉到的危险也越大。因此应当用相对速度在两船连线上的分量来作为一个影响因素。但由于通常 DCPA<sub>0</sub> 较小,因此可直接用相对速度作为影响因素。另一个影响因素是船速比。由于慢船的避让效果差,因此慢船采取行动的时机要早一些。遗憾的是目前尚无定量的结果。

### 1.6 船舶的让路义务

根据避碰规则十七条的规定,直航船采取行动的时机要晚一些。在这方面文献[6]进行了研究,由此我们得出直航船的 TCPA<sub>s</sub> 是让路船的 0.6 倍。

### 1.7 人和船的反应时间

文献[7]对人的反应时间( $t_m$ )进行了研究,根据其结果,我们将  $t_m$  取为 3min,作为驾驶员判断本模型决策结果正误的时间。船的反应时间  $t_s$  为:

$$t_s = \frac{\frac{\Delta C}{K\delta} + T}{60}$$

式中: $t_s$  为船由直航到转向  $\Delta C$  角所用的时间; $\delta$  为使用的舵角; $K, T$  分别为在该舵角下的回旋性指数和航向稳定性指数。

### 1.8 船舶尺度对 AT 的影响

用系数  $l$  表示船长  $L$  对 DCPA<sub>s</sub> 的影响:

$$l = \frac{L}{150 \times \text{DCPA}_s}$$

### 1.9 其他因素的影响

本模型要求驾驶员假设本船和来船都是普通万吨级船舶,船长150m,船速15n mile/h,于白天(互见中)发生对遇会遇,DCPA<sub>0</sub>为零,q为零。在这种情况下,驾驶员根据当时的水域情况、风浪情况、交通密度、船舶操纵性能、载货及驾驶员的水平和经验等等,给出DCPA<sub>s</sub>和TCPA<sub>s</sub>,以便代入模型,计算AT。

## 2 船舶领域的模糊边界

现有模型认为当DCPA<sub>0</sub>小于DCPA<sub>s</sub>时,驾驶员就要在适当时刻采取避让行动。这是不确切的,因为当DCPA<sub>0</sub>与DCPA<sub>s</sub>相差很小时,即使DCPA<sub>0</sub> < DCPA<sub>s</sub>,驾驶员也可能不采取行动。为了对此进行模拟,我们建立模糊集合S来表示“很小”这一模糊概念,其隶属函数如下(见图1):

$$\begin{cases} \mu_S(y) = \lambda_3 y^{\lambda_4} + 1, & y \leq y_0 \\ \mu_S(y) = 0, & y > y_0 \end{cases}$$

其中:

$$y = \left| \frac{\text{DCPA}_s - \text{DCPA}_0}{\text{DCPA}_s} \right|, \quad y_0 = (-\lambda_3)^{-1/\lambda_4}$$

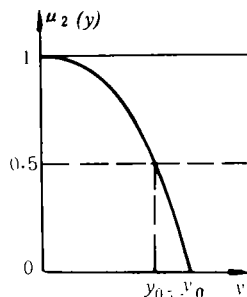


图1 模糊集“很小”的隶属函数

在船舶领域中,DCPA<sub>s</sub>即为领域半径。船舶领域模糊边界(fuzzy boundary of domain, FBD)的概念是:若来船相对运动线在模糊边界之外,则是安全的,不采取行动;若来船相对运动线在模糊边界之中,则是危险的,但由于危险度很小,可以不采取行动;若来船相对运动线在模糊边界之内,则是危险的,要采取避让行动,使之保持在模糊边界之外(见图2)。由调查结果得:λ<sub>3</sub>=-1.4, λ<sub>4</sub>=0.8。取0.5水平集,得

$$\text{FBD} = 0.276\text{DCPA}_s$$

## 3 最危险时刻

在现有理论中人们一直认为TCPA为零时是最危险的。实际上,这只在DCPA<sub>0</sub>=0时才成立。假设有一来船T,航向与本船相反,0 < DCPA<sub>0</sub> < DCPA<sub>s</sub>(见图3)。开始时由于TCPA很大,所以碰撞危险度(collision risk, CR)很小;随着TCPA越来越小,来船行动的不确定性越来越大,CR也越来越大。但是,当来船接近最近会遇距离点CPA时,来船行动的不确定性大大减小,CR也越来越小。其中使CR取最大值的TCPA即为最危险时刻(time of maximum risk, TMR)。TMR受DCPA<sub>0</sub>的影响,DCPA<sub>0</sub>=0时,TMR=0,CR的峰值最大;随着DCPA<sub>0</sub>的增加,TMR也增大,CR的峰值则逐渐减小;当DCPA<sub>0</sub> ≥ DCPA<sub>s</sub>时,CR的峰值减为零,此时也就无所谓TMR了。

## 4 确定AT的模型

本文在建立确定AT的模型时使用了物元分析中的可拓集合的方法。所谓物元,就是

物元分析理论中作为描述事物的基本元,用  $R$  表示,即  $R=(M, C, X)$ 。其中,事物  $M$ ,特征  $C$  和事物关于特征所取的量值  $X$  称为物元的三个要素。

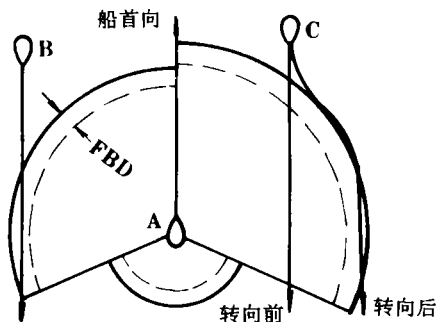


图2 船舶领域的模糊边界

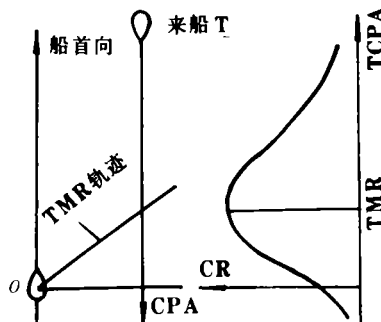


图3 最危险时刻

在本模型中我们讨论三种事物:会遇、危险局面和来船,目的是确定会遇中哪些来船是危险的,并在危险程度达到一定阈值时采取避让行动。在刻画危险程度时我们使用了可拓集合的方法。

上述思想用物元分析的方法加以描述,即为建立表征会遇、危险和来船的物元,即

$$R = \begin{pmatrix} \text{会遇}, \text{DCPA}, \langle a_1, b_1 \rangle \\ \text{TCPA}, \langle a_2, b_2 \rangle \end{pmatrix}$$

$$R_0 = \begin{pmatrix} \text{危险}, \text{DCPA}, \langle a_{01}, b_{01} \rangle \\ \text{TCPA}, \langle a_{02}, b_{02} \rangle \end{pmatrix}$$

$$r = \begin{pmatrix} \text{来船}, \text{DCPA}, x_1 \\ \text{TCPA}, x_2 \end{pmatrix}$$

式中:  $x_1 = \text{DCPA}_2$ ;  $x_2 = \text{TCPA}$ ; 在上式中  $\langle a_1, b_1 \rangle$  是事物会遇关于特征 DCPA 所取的量值,其余涵义相同。本模型的目的是对于任一物元  $r, r \in R$ , 计算  $r$  与  $R_0$  的关联度  $K(x)$ , 当  $K(x)$  达到一定阈值时,采取避让行动。下面是计算步骤:

第一,按第2节所做的讨论,据具体情况进行  $\text{DCPA}_s$  和  $\text{TCPA}_s$  的修正,其流程图略。

第二,如果  $\text{DCPA}_0 > 0.724\text{DCPA}_s$ , 则不采取行动。

第三,将阈值取为 1, 并根据第3节所做的讨论,建立关联函数如下(见图4):

$$\text{TMR} = 0.4\text{TCPA}_t \left| \frac{\text{DCPA}_0}{\text{DCPA}_s} \right| \quad (1)$$

$$K(x_1) = 3 \left( \frac{2}{3} \right)^{\left( \frac{x_1}{\text{DCPA}_s} \right)^2} - 2 \quad (2)$$

$$\begin{cases} K(x_2) = 3 \left( \frac{2}{3} \right)^{\left( \frac{x_2 - 1.5\text{TMR}}{\text{TCPA}_t} \right)^2} - 2, & x_2 < \text{TMR} \\ K(x_2) = 3 \left( \frac{2}{3} \right)^{\left( \frac{x_2}{\text{TCPA}_t} \right)^2} - 2, & x_2 \geq \text{TMR} \end{cases} \quad (3)$$

$$K(x) = K(x_1) + K(x_2) \quad (4)$$

当  $K(x) = 1$  时采取避让行动。

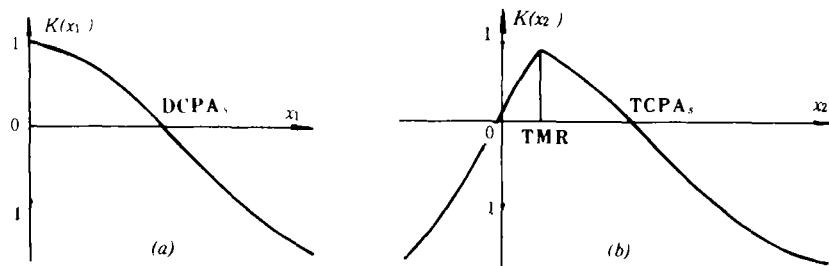


图4 关联函数

表1 夜间动界的决策结果

方位 (°)	-40	-35	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20
AT (min)	7.83	6.1	5.77	5.51	5.32	4.14	4.06	8.03	8	8.03	8.12	8.28	8.51
D	3	2.5	2.5	2.5	2.5	2	2	4	4	4	4	4	4
方位 (°)	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
AT (min)	8.82	9.23	9.76	10.44	11.31	12.44	13.94	16	18.92	23.39	34.77	51.82	103.3
D	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4.5	4.5	4.5

表1是互见中夜间采取行动时两船距离的决策结果。其中两船都是长为150m,船速为15kn的万吨级货船, $DCPA_0=0$ , $DCPA_s=1$ n mile(左舷), $TCPA_s=8$ min, $D$ 为AT时两船间距离。从表中可以看出,对于左舷来船,本船行动得比较晚;而舷角比较大时,行动时机比较早。由此可见,本模型的决策结果既切合实际又符合避碰规则的要求。

## 5 讨论

(1)由式(2)~(4)可以得出采取避让行动的时机:

$$AT = TCPA_s \sqrt{\frac{\ln\left[\left(\frac{5}{3}\right) - \left(\frac{2}{3}\right) x_1 / DCPA_s\right]}{\ln\left(\frac{2}{3}\right)}}$$

根据上面的讨论,自动避碰系统应在 $AT+t_m+t_s$ 时向驾驶员推荐避让时机的决策结果,其值为 $AT+t_s$ ,由驾驶员判断该决策是否可行。

(2)文献[10]考虑了传感器的误差,并指出在CPA时他船位置分布可以认为是以CPA为中心的正态分布(见图5)。设 $x$ 处的概率 $\eta$ , $DCPA_0=DCPA$ 时的 $K(x)$ 值为 $K_0(x)$ ,则考虑传感器误差的危险度, $K(x)$ 值为

$$K(x) = \int_{d_2}^{d_1} \eta K_0(x) dx$$

式中: $d_1=DCPA_{s1}-FBD_1$ ;  $d_2=DCPA_{s2}-FBD_2$ ;  $DCPA_{s1}$ 、 $DCPA_{s2}$ 为按图4修正后的安全通过距离; $DCPA_{s1}$ 在左舷或船尾; $DCPA_{s2}$ 在右舷或船首。当 $K(x) \geq 1$ 时采取避让行动。

## 6 结束语

本文应用可拓集合论,结合有关避碰理论,建立了确定船舶避碰行动开始时机的模型。但该模型还有待于进一步进行研究,特别是在考虑相对速度和船速比的影响方面以及关联函数的建立方面,更是如此。应用新的理论进行海上船舶避碰研究,这还仅仅是个开端,今后还会有许多工作要做。

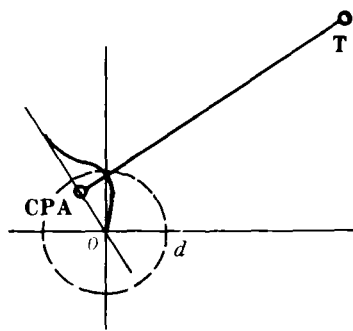


图5 CPA的预测精度

## 参 考 文 献

- 1 Goodwin E M. *A Statistical Study of Ship Domains*. The Journal of Navigation, 1975; 28(2): 328
- 2 Coldwell T G. *Marine Traffic Behaviour in Restricted Waters*. The Journal of Navigation, 1983; 36(1): 130
- 3 Fujii Y and Tanaka K. *Traffic Capacity*. The Journal of Navigation, 1971; 24(3): 543
- 4 杨治良等. 成人个人空间圈的实验研究. 心理科学通讯, 1988(2)
- 5 赵劲松. 最小安全转向避让幅度的简易算法. 航海技术, 1988(6)
- 6 Davis P V, Dove M T and Stocket C T. *A Computer Simulation of Marine Traffic Using Domains and Arenas*. The Journal of Navigation, 1980; 33(1): 206
- 7 Curtis R G. *Determination of Mariners' Reaction Times*. The Journal of Navigation, 1978; 31(3): 408
- 8 胡在钧. 用船舶操纵性指标KT值计算航海问题. 航海技术, 1983(4)
- 9 蔡文. 物元分析. 广州: 广东高等教育出版社, 1987
- 10 IMAZU H and KOYAMA T. *The Determination of Collision Avoidance Action*. The Journal of Japan Institute of Navigation, 1984; 70

## Model for Determining Right Moment for Collision Avoidance Action

Zhao Jingsong      Wang Fengchen

(Navigation Department, DMC)

### Abstract

The effect of the relavent factors on the determination of the right moment for taking a collision avoidance action is analysed, and the concepts of the fuzzy boundary of a ship's domain and the maximum risk moment are defined. In accordance with the Theory of Extension Set, a model is established for deciding the starting time for taking a collision avoidance action.

**Key Words:** Moment for collision avoidance action, ship domain, Fuzzy boundary, Maximum risk moment, Automatic collision avoidance system